



К 85-летию Национальной академии наук Беларуси

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ:

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ,
НОВЫЕ ПОРОШКОВЫЕ
КОМПОЗИЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ. СВАРКА

1
часть

Сборник докладов
8-го Международного
симпозиума

Минск, 10–12 апреля 2013 г.



POWDER METALLURGY:

SURFACE ENGINEERING,
NEW POWDER COMPOSITE
MATERIALS. WELDING

Reports Collection
of 8th International Symposium

Minsk, April, 10th–12th, 2013

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии
Институт порошковой металлургии
Европейская ассоциация порошковой металлургии
Европейская федерация сварки

*Светлой памяти
академика О. В. Романа*

**ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ:
ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ,
НОВЫЕ ПОРОШКОВЫЕ
КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.
СВАРКА**

**POWDER METALLURGY:
SURFACE ENGINEERING,
NEW POWDER COMPOSITE MATERIALS.
WELDING**

*Сборник докладов 8-го Международного симпозиума
(Минск, 10–12 апреля 2013 г.)*

В двух частях



Часть 1



Минск
«Беларуская навука»
2013

УДК [621.762+621.791/.795](082)

ББК 34.39я43

П59

Редакционная коллегия:

руководитель аппарата Президиума НАН Беларуси, акад. НАН Беларуси,
д-р техн. наук, проф. *П. А. Витязь* (главный редактор);
генеральный директор ГНПО порошковой металлургии, чл.-кор. НАН Беларуси,
д-р техн. наук, проф. *А. Ф. Ильющенко* (зам. главного редактора);
директор ОХП ИСЗП, канд. физ.-мат. наук *М. А. Андреев*;
директор ОХП НИИ ИП с ОП, д-р техн. наук *Л. В. Судник*;
зам. проректора по НИЧ БНТУ, д-р техн. наук, доц. *А. С. Калишченко*;
зам. генерального директора ГНПО порошковой металлургии,
д-р техн. наук, проф. *Е. Е. Петюшик*;
зам. директора ОХП ИСЗП, канд. техн. наук *А. И. Радченко*;
первый зам. директора ГНУ ИПМ, канд. техн. наук, доц. *В. В. Савич*;
гл. науч. сотрудник ОХП НИИ ИП с ОП, д-р техн. наук *В. Г. Смирнов*;
ведущий науч. сотрудник ОХП ИСЗП, канд. техн. наук *А. И. Шевцов*;
зам. акад.-секретаря ОФТН НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. *М. Л. Хейфец*

Рецензенты:

зам. проректора по НИЧ БНТУ, д-р техн. наук, доц. *А. С. Калишченко*;
зам. начальника отд-ния ОИМ, д-р техн. наук, доц. *В. И. Жорник*;
зав. каф. «Технология металлов» БГАТУ, д-р техн. наук, проф. *В. М. Катцевич*;
проф. каф. «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов»,
д-р техн. наук *В. Н. Ковалевский*

П59 Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка = Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials. Welding: сб. докл. 8-го Междунар. симп. (Минск, 10–12 апр. 2013 г.). В 2 ч. Ч. 1 / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол. : П. А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 523 с. : ил.

ISBN 978-985-08-1548-4.

В настоящий сборник включены доклады Международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка» (10–12 апреля 2013 г.), который начиная с 1999 г. в 8-й раз проводится в Минске в рамках международных выставок «Порошковая металлургия» и «Сварка». Среди авторов – ведущие ученые и специалисты Беларуси, России, Украины, Латвии, Эстонии и Армении. Статьи публикуются в виде, представленном авторами, без дополнительного научного редактирования.

УДК [621.762+621.791/.795](082)

ББК 34.39я43

The reports of International symposium “Powder Metallurgy: Surface engineering. New powder composition materials. Welding” (April 10-12, 2013) have been included into the current collection. The symposium is held in Minsk starting from 1999 within the framework of international exhibitions “Powder metallurgy” and “Welding”. The given symposium is considered to be the 8th one. The leading scientists and specialists from Belarus, Russia, the Ukraine, Latvia, Estonia and Armenia are among the authors. Articles are published as submitted by the authors without additional scientific editing.

ISBN 978-985-08-1548-4 (ч. 1)

ISBN 978-985-08-1547-7

© Институт порошковой металлургии, 2013

© Оформление. РУП «Издательский дом
«Беларуская навука». 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Витязь П. А., Ильюшенко А. Ф., Савич В. В. (<i>Президиум НАН Беларуси, Минск, Беларусь; ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Новые разработки в области порошковой металлургии в Беларуси (2011–2012 гг.)	23
---	----

Секция I

Порошковая металлургия: материалы, технологии, оборудование

Азаров С. М., Азарова Т. А., Петюшик Е. Е., Балыдко Д. Н. (<i>БНТУ, Минск, Беларусь; ИОНХ НАН Беларуси, Минск, Беларусь; ГНПО ПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Получение пористых материалов с использованием СВС-технологий	56
Азарова Т. А., Азаров С. М., Петюшик Е. Е. (<i>ИОНХ НАН Беларуси, Минск, Беларусь; ГНПО ПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Особенности формирования фильтрующих слоев на пористой силикатной керамике	58
Баглюк Г. А., Напара-Волгина С. Г., Кудь В. К., Орлова Л. Н. (<i>ИПМ НАН Украины им. И. Н. Францевича, Киев, Украина</i>). Спеченные износостойкие стали системы Fe-Si-B-C с гетерогенной структурой	65
Богинский Л. С., Реут О. П. (<i>ИПК и ПК БНТУ, Минск, Беларусь</i>). Совершенствование процессов и оборудования сухого изостатического прессования уплотняемых материалов	76
Бойко Ю. И., Волосюк М. А., Кононенко В. Г. (<i>ХНУ им. В. Н. Каразина, Харьков, Украина</i>). Формирование дислокационной структуры в области контакта между сдавливаемыми кристаллическими телами.	76
Бондаренко В. П., Гнатенко И. А. (<i>ИСМ НАН Украины, Киев, Украина</i>). Влияние содержания кобальта на состояние карбидного скелета в спеченных среднезернистых сплавах системы WC-Co	83
Витязь П. А., Жорник В. И. (<i>ОИМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Антифрикционные материалы и покрытия, модифицированные наноразмерными алмазно-графитовыми добавками	90
Витязь П. А., Жорник В. И., Горанский Г. Г., Кукареко В. А., Полуян А. И. (<i>ОИМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь; БНТУ, Минск, Беларусь</i>). Структура и свойства спеченных композитов на основе отходов твердого сплава	97

Витязь П. А., Ковалева С. А., Жорник В. И., Кукареко В. А., Григорьева Т. Ф., Полуян А. И., Гамзелева Т. В. (<i>ОИМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь; ИХТТМ СО РАН, Новосибирск, Россия; ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Влияние фазового состава механо-синтезированных порошков системы Cu-Sn на триботехнические свойства спеченных композитов	103
Витязь П. А., Лецко А. И., Талако Т. Л., Парницкий Н. М. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Исследование свойств жаростойкого порошка на основе интерметаллида FeAl, легированного Cr	109
Гаврилова Н. Н., Каткевич М. Д., Назаров В. В., Ситник А. С., Скудин В. В. (<i>РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия</i>). Получение молибденовых синей и порошкообразных катализаторов на их основе.	113
Гаврилова Н. Н., Каткевич М. Д., Назаров В. В., Скудин В. В. (<i>РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия</i>). Получение композиционных мембранных катализаторов на основе Mo ₂ C золь-гель методом	118
Гаршин А. П., Шумячер В. М., Пушкарёв О. И. (<i>СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия</i>). Способ получения и свойства композиционного абразивного материала на основе карбида кремния и корунда.	124
Голубцова Е. С. (<i>БНТУ, Минск, Беларусь</i>). Выбор марки исходного порошка дисилицида молибдена и времени его измельчения при создании электропроводящего композиционного материала на основе нитрида кремния.	129
Голякова И. Н., Горохов В. М., Тарусов И. Н. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Влияние температуры и скорости закалки на твердость и изменение размеров порошковых низколегированных сталей при термообработке в потоке холодного эндогаза	136
Гопинат Н., Фёдоров Д. Н. (<i>«FLUIDTHERM TECHNOLOGY», Ченнаи, Индия</i>). Разработка конструкций промышленных печей для порошковой металлургии	142
Горанский Г. Г. (<i>БНТУ, Минск, Беларусь</i>). Критерии и кинетика структуро- и фазообразования дисперсных систем при измельчении.	147
Горанский Г. Г., Жорник В. И., Полуян А. И. (<i>БНТУ, Минск, Беларусь; ОИМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Особенности импульсного электроконтактного спекания порошковых композиций на основе вольфрамсодержащих отходов.	154
Горохов В. М., Ильющенко А. Ф. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Получение колец синхронизатора коробки передач трактора «Беларус» из порошков низколегированных сталей методами теплого и холодного прессования	161
Довыденков В. А., Зверева О. С. (<i>ООО «Наномет», Йошкар-Ола, Россия; ПГТУ, Йошкар-Ола, Россия</i>). Теоретическая оценка возможных изменений концентрации твердой фазы при формировании композиций порошок–связующее	166

Дорофеев В. Ю., Кочкарова Х. С. (<i>ЮРГТУ (НПИ), Новочеркасск, Россия</i>). Влияние микролегирования натрием и кальцием на формирование дефектов при термической обработке горячедеформированных порошковых сталей	170
Дорофеев Ю. Г., Дорофеев В. Ю., Бабец А. В., Бессарабов Е. Н. (<i>ЮРГТУ (НПИ), Новочеркасск, Россия</i>). Получение и свойства порошковых биметаллических материалов и изделий.	182
Земцова Е. Г., Морозов П. Е., Власова М. В., Смирнов В. М. (<i>СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия</i>). Получение наночастиц железа восстановлением оксидгидроксида железа (III) водородом	189
Ильющенко А. Ф., Киреев П. Н., Побережный С. В., Голякова И. Г., Савич В. В. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Исследование процесса спекания прессовок на основе исходных и плакированных частиц железного порошка	193
Ильющенко А. Ф., Петюшик Е. Е., Прохоров О. А., Дробыш А. А. (<i>ГНПО ПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь; ГНУ ИПМ, Минск, Беларусь; БНТУ, Минск, Беларусь</i>). Оценка эффективности уплотнения преформ углерод-углеродного композиционного материала.	198
Ильющенко А. Ф., Рак А. Л., Конев С. В., Дубовик О. В., Кусин Р. А., Шуганов А. Д., Черняк И. Н. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь; ГНПО ПМ, Минск, Беларусь; ИТМО им. А. В. Лыкова, Минск, Беларусь; БГАТУ, Минск, Беларусь; ОХП НИИ ИП с ОП, Минск, Беларусь</i>). Модель расчета теплопередачи теплообменников с пористым порошковым оребрением	201
Капцевич В. М., Корнеева В. К., Кусин Р. А., Лисай Н. К., Закревский И. В. (<i>БГАТУ, Минск, Беларусь</i>). Свойства двухслойных волоконных фильтроэлементов, полученных методом сухого изостатического прессования из медных отходов	207
Капцевич В. М., Леонов А. Н., Кусин Р. А., Чугаев П. С., Булыго Д. М., Корнеева В. К. (<i>БГАТУ, Минск, Беларусь</i>). Оценка анизотропии структурных и гидродинамических свойств объемно-сетчатых материалов	212
Ковтун В. А., Пасовец В. Н. (<i>ГИИ МЧС РБ, Гомель, Беларусь; ГГТУ им. П. О. Сухого, Гомель, Беларусь</i>). Напряженно-деформированное состояние порошковых систем медь – УНТ при воздействии сжимающей нагрузки в процессе электроконтактного спекания.	218
Комаров О. С., Судник Л. В., Нисс В. С., Волосатиков В. И., Комарова Т. Д. (<i>БНТУ, Минск, Беларусь; ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь; ГП «НТП БНТУ «Политехник», Минск, Беларусь</i>). Влияние технологических параметров на выделение дисперсных частиц $Al(OH)_3$ из пересыщенного раствора $NaAlO_2$	225
Красный Б. Л., Тарасовский В. П., Красный А. Б. (<i>ЗАО «НТЦ «Бакор», Москва, Щербинка, Россия</i>). Количественный анализ микроструктуры образцов корундовой керамики, спеченной при различных температурах, по их изображениям в растровом электронном микроскопе	231

Маслюк В. А., Байталюк Б. С., Баглюк Г. А., Носенко В. К. (ИПМ НАН Украины им. И. Н. Францевича, Киев, Украина). Влияние количества порошкового наполнителя из нанокристаллического сплава FINEMET и типа полимерного связующего на магнитные и электрические свойства композитов	236
Маслюк В. А., Яковенко Р. В., Баглюк Г. А., Подрезов Ю. Н., Варченко В. Т., Курась В. Б. (ИПМ НАН Украины им. И. Н. Францевича, Киев, Украина). Влияние состава матричной фазы на физико-механические и триботехнические свойства порошковых железо-хром-углеродистых материалов.	247
Мионов В., Кольбе М., Земченков В., Лапковский А. (Рижский технологический университет, Рига, Латвия; Институт машиностроительного оборудования Нижнесаксонского технического университета, Цвиккау, Германия). Исследования в области магнитно-импульсной обработки порошковых деталей.	254
Нарва В. К., Маранц А. В., Сентюринна Ж. А. (НИТУ «МИСиС, Москва, Россия). Свойства материалов карбид титана – сталь после лазерной наплавки и термической обработки	262
Орыщенко А. С., Самоделкин Е. А., Кузнецов П. А., Герашенкова Е. Ю. (ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия). Технология сверхскоростной дезинтеграторной обработки аморфной ленты для получения магнитных порошковых материалов требуемого фракционного состава	267
Пасовец В. Н., Ковтун В. А., Орловская Я. М. (ГИИ МЧС РБ, Гомель, Беларусь; ГГТУ им. П. О. Сухого, Гомель, Беларусь). Оценка влияния времени спекания на физико-механические характеристики наноструктурированных композитов на основе порошковых систем медь – УНТ и медь – ЛНУ.	274
Перельман Г. В. (МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия). Компьютерный анализ процесса течения порошковых и композиционных материалов через каналы с локальным уменьшением сечения	279
Попович А. А., Ван Цин Шен (СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия). Исследование процесса получения перспективного катодного материала $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$	288
Попович А. А., Разумов Н. Г., Силин А. О. (СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия). Исследование фазообразования в системе Fe-Ni при механолегировании	293
Прибытков Г. А., Коржова В. В., Богомоллов В. А., Гринберг П. Б. (ИФПМ СО РАН, Томск, Россия; Омский НИИД, Омск, Россия). Микроструктура, фазовый и элементный состав покрытий, полученных вакуумно-дуговым испарением порошковых катодов Al-Cr, Al-Cr-Si в различных газовых средах.	299

Прямилова Е. Н. (<i>ПНИПУ, Пермь, Россия</i>). Свойства керамики на основе нитрида кремния	305
Роман О. В., Петюшик Е. Е., Судник Л. В., Шмурадко В. Т., Киршина Н. В. (<i>ОХП НИИ ИП с ОП, Минск, Беларусь</i>). Исследование влияния ударно-волнового нагружения на структурообразование в оксидных системах	309
Савич В. В., Пронкевич С. А., Шелухина А. И., Горохов В. М. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Моделирование деформации частицы несферического порошка титана при одностороннем прессовании пуансоном, плакированным эластичной облицовкой	314
Савич В. В., Шелухина А. И. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Влияние твердости формующего инструмента на приповерхностную пористость образца, полученного прессованием и спеканием губчатого порошка титана.	320
Сайков И. В., Первухина О. Л. (<i>ИСМАН, Черноголовка, Россия</i>). Получение керметов TiB ₂ -Al и TiC-Ni методом ударно-волновой обработки СВС-составов.	325
Сафонова А. М. (<i>ИОНХ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Структура, свойства и области применения металлоуглеродных волокнистых наполнителей.	327
Сизоненко О. Н., Баглюк Г. А., Григорьев Е. Г. (<i>ИПМ НАН Украины им. И. Н. Францевича, Киев, Украина</i>). Высоковольтный электрический разряд как метод подготовки порошков к консолидации	334
Симонова Е. В. (<i>НИТУ МИСиС, Москва, Россия</i>). Упрочнение металломатричных композиционных материалов малым количеством наноразмерных частиц	343
Смирнов В. М., Шалунов Е. П. (<i>ФГБОУ ВПО ЧувГУ, Чебоксары, Россия</i>). Особенности формирования структуры и свойств композиционных материалов Cu-Al ₂ O ₃ -C, получаемых методом реакционного механического легирования	344
Степанов И. Б., Прибытков Г. А., Фирсина И. А., Иванов Ю. Ф. (<i>ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, Томск, Россия; ИФПМ СО РАН, Томск, Россия; ФГБУН ИСЭ СО РАН, Томск, Россия</i>). Свойства нитридных покрытий, полученных вакуумно-дуговым испарением порошковых катодов Ti-Al, Ti-Al-Si.	350
Судина С. В., Шуменко В. Н., Шуменко В. В. (<i>НИТУ «МИСиС», Москва, Россия; РСА, Москва, Россия</i>). Применение очищенного опилового шлама для получения спеченных изделий	356
Федоров Д. Н. (<i>«FLUIDTHERM TECHNOLOGY», Ченнаи, Индия</i>). Восстановление гематитового концентрата водородом с его рециркуляцией. Практический опыт внедрения в пилотном масштабе.	360
Шалунов Е. П., Шведов М. А., Смирнов В. М., Архипов И. В. (<i>ФГБОУ ВПО ЧувГУ, Чебоксары, Россия</i>). Условия и особенности фор-	

мирования в порошковых материалах на основе алюминия нанокристаллической матрицы и синтеза дисперсоидов в ней.	366
Шелехина В. М. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Активация процессов спекания порошковых материалов на основе оксидной керамики	372
Шишкина А. С., Первухин Л. Б., Сайков И. В. (<i>НИТУ «МИСиС», Москва, Россия; ФГБУН ИСМАН, Черноголовка, Россия</i>). Взрывное прессование порошка никелевого сплава, модифицированного нанопленкой оксида иттрия	376
Шуменко В. Н., Логинова Т. В., Жекибаев М. М., Горжанов И., Шуменко В. В. (<i>НИТУ «МИСиС», Москва, Россия; РСА, Москва, Россия</i>). Твердофазное спекание твердых сплавов. Жидковязкое течение. . .	378
Шуменко В. Н., Логинова Т. В., Жекибаев М. М., Горжанов И., Шуменко В. В. (<i>НИТУ «МИСиС», Москва, Россия; РСА, Москва, Россия</i>). Процессы, проходящие при спекании твердых сплавов	382
Шуменко В. В., Шуменко В. Н. (<i>РСА, Москва, Россия; НИТУ «МИСиС» Москва, Россия</i>). Развитие теории капиллярно-пористого тела А.В. Лыкова: взаимодействие с лиофобной жидкостью.	387
Шуменко В. В., Шуменко В. Н., Жекибаев М. М., Логинова Т. В., Судина С. С., Горжанов И. (<i>РСА, Москва, Россия; НИТУ «МИСиС», Москва, Россия</i>). Новые физические явления при прессовании порошковых материалов.	390

Секция 2

Новые порошковые композиционные материалы: проблемы получения и применение

Александров В. М., Лобачев В. А., Киршина Н. В. (<i>ОХП НИИ ИП с ОП, Минск, Беларусь</i>). Методика определения фактической площади контакта компактного и пористого материала в результате силового и термического воздействия.	396
Александров В. М., Лобачев В. А., Шелег В. К., Бохан С. Г. (<i>ОХП НИИ ИП с ОП, Минск, Беларусь; БНТУ, Минск, Беларусь</i>). Физико-механические свойства компактно-пористых материалов.	399
Барай С. Г., Талако Т. Л., Насонова Н. В., Пухир Г. А. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь; БГУИР, Минск, Беларусь</i>). Поглощающие свойства композиционных материалов на основе Ni-Zn ферритов в диапазоне СВЧ.	405
Близнак Л. А., Басов Н. А., Климза А. А., Каско В. И. (<i>ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь</i>). Композиционный керамический материал для рабочей камеры плазменного светильника.	409

Бухаркина Т. В., Витязь П. А., Гаврилова Н. Н., Назаров В. В., Скудин В. В., Судник Л. В. (<i>РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия</i>). Применение композиционных мембранных катализаторов	413
Горохов В. М., Тарусов И. Н. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Структура и свойства порошковых композиционных материалов на основе вольфрама для применения в качестве радиационно-защитных деталей	420
Горынин И. В., Васильева О. В., Кузнецов П. А., Маннинен С. А., Рамалданова А. А. (<i>ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия</i>). Порошковые композиционные материалы для систем электромагнитной защиты технических средств	423
Ильющенко А. Ф., Звонарев Е. В., Осипов В. А., Фомихина И. В. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). К вопросу о получении силицированного графита и карбидокремниевой керамики конструкционного назначения	431
Ильющенко А. Ф., Дмитрович А. А., Сарока Д. И., Голод Е. В., Роговой А. Н., Криволапов П. Н. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Композиционные фрикционные материалы на основе целлюлозных волокон	446
Ильющенко А. Ф., Цедик Л. В., Белов Д. А. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Исследование смачивания модифицированных пленок L-PLA материалов матриксов-носителей для биомедицинских клеточных технологий	451
Мазюк В. В., Анчевский П. С. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Получение испарителей контурных тепловых труб с капиллярной структурой на основе композиционных порошковых материалов	457
Микуцкий В. А., Марукович А. И., Смoryго О. Л., Щуревич Д. И. (<i>ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i>). Эффективность поглощения электромагнитного излучения оптического диапазона высокопористыми ячеистыми материалами с функциональными покрытиями различного состава	458
Пашко С. А., Кем А. Ю. (<i>ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия</i>). Экологически значимые аспекты порошковой металлургии никеля и никельсодержащих шихт	463
Петров Е. В., Кривченко А. Л., Кирсанов Р. Г. (<i>ФГБУН ИСМАН РАН, Черноголовка, Россия; СГТУ, Самара, Россия; СГСА, пос. Усть-Кинельский, Самарская область, Россия</i>). Влияние угла соударения высокоскоростного потока частиц на поверхность преграды	467
Прибытков Г. А., Вагнер М. И., Фирсина И. А., Коржова В. В. (<i>ФГБУ ИФПМ СОРАН, Томск, Россия</i>). Спеченные порошковые композиции титан–силицид титана	471
Петюшик Е. Е., Романенков В. Е., Евтухова Т. Е., Афанасьева Н. А. (<i>ГНПО ПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь; БНТУ, Минск, Беларусь</i>). Материаловедческие тенденции совершенствования тепловых труб	477

Романенков В. Е., Афанасьева Н. А., Петюшик Е. Е., Евтухова Т. Е. (БНТУ, Минск, Беларусь; ГНПО ПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь). Синтез бипористого наноструктурного фитиля тепловых труб: результаты апробации.	486
Рудь В. Д., Самчук Л. М., Гулиева Н. М. (ЛНТУ, Луцк, Украина). Использование СВС-процесса для получения композиционных материалов.	496
Савчук Г. К., Карпей А. Л., Летко А. К. (ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь). Керамический материал для элементов антенн	501
Семченко А. В., Сидский В. В., Судник Л. В., Колос В. В., Турцевич А. С., Асадчий А. Н. (ГГУ им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь; ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь; ОАО «ИНТЕГРАЛ», Минск, Беларусь). Применение золь-гель метода для синтеза сегнетоэлектрических материалов	508
Сенють В. Т., Ковалева С. А., Мосунов Е. И., Валькович И. В. (ОИМ НАН Беларуси, Минск, Беларусь). Получение сверхтвердых поликристаллов на основе плотных форм нитрида бора после модифицирования	513
Турцевич А. С., Дудкин А. И., Соловьев Я. А., Керенцев А. Ф., Чирко И. В. (ОАО «Интеграл», Минск, Беларусь). Применение высокодисперсных порошковых материалов при изготовлении СВЧ-транзисторов	519

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В БЕЛАРУСИ (2011–2012 гг.)

П. А. Витязь¹, А. Ф. Ильющенко², В. В. Савич²

¹Президиум НАН Беларуси, Минск, Беларусь

²Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

Введение. На основании обзора зарубежной литературы, собственных наблюдений и выводов авторами работ [1–10] выполнен анализ мирового состояния порошковой металлургии как отрасли современного наукоемкого высокотехнологичного производства, оценены основные тенденции, особенности и перспективы ее развития, уровень исследований, разработок и производств порошковой металлургии, сопоставлен с мировым уровнем и тенденции отрасли в Беларуси. Показано, что в основном состоянии и развитие порошковой металлургии в Беларуси ориентированы на изменяющиеся потребности рынка Беларуси, России, Украины. Порошковая металлургия в Беларуси постоянно модернизируется, осваивает передовые зарубежные материалы, технологии и оборудование, в то же время не остается в стороне и от проведения поисковых и прикладных НИР, ОТР, конечной целью которых является повышение эксплуатационных характеристик изделий, получаемых методами порошковой металлургии, а также снижение издержек их производства.

Цель данной работы – представление наиболее значимых результатов, полученных учеными и специалистами Беларуси за 2011–2012 гг.

Высокопрочные порошковые стали и изделия из них

Продолжаются исследования в области теплого прессования порошковых пластифицированных смесей. Экспериментально исследовано влияние плотности сырых порошковых прессовок

из порошковых смесей Densmix на основе диффузионно-легированных порошков Distaloy AE и DC на напряжение разрушения при различных видах испытаний: нагружение плоского диска вдоль его образующей и поперечный изгиб [11]. Показано, что прочность порошковых прессовок после теплого прессования в среднем на 25–35 % выше прочности после холодного прессования при одинаковой плотности. Установлено, что напряжение разрушения существенно зависит от плотности и изменяется в интервале от 0,35 МПа при низкой плотности (65 % от теоретической) до 7,5 МПа при высокой плотности (98 %), т. е. увеличивается практически в 50 раз (рис. 1).

В ряде случаев, когда необходима умеренная объемная прочность материала, можно избежать затрат на дорогостоящие легирующие добавки и применять микролегирование. Количество добавки при этом, как правило, составляет 0,1–5 %. Ультрадисперсные и нанокристаллические материалы обладают уникальными физическими и механическими свойствами (прочность, твердость, усталостная прочность) и их введение в качестве ле-

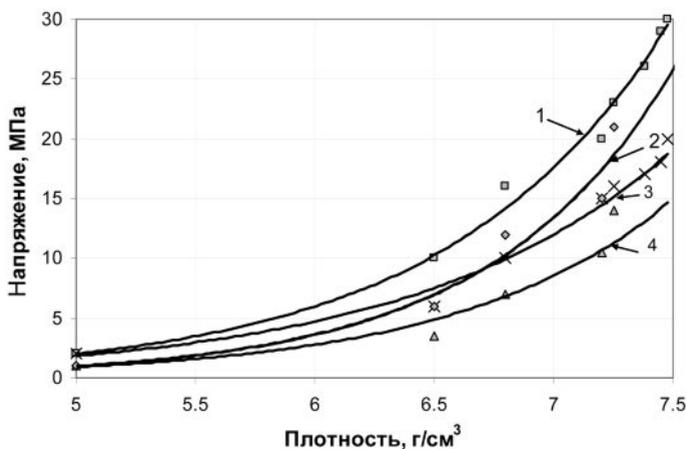


Рис. 1. Влияние плотности на разрушающее напряжение порошковых прессовок при поперечном изгибе: 1 – Distaloy AE + 0,6 % С + 0,6 % DM120 (теплое прессование); 2 – Distaloy AE + 0,6 % С + 0,6 % DM120 (холодное прессование); 3 – Distaloy DC + 0,3 % С + 0,6 % DM120 (теплое прессование); 4 – Distaloy DC + 0,3 % С + 0,6 % DM120 (холодное прессование)

гирующих добавок позволяет повысить свойства материалов. Так, введение нанопорошков меди или лигатуры железо – медь в порошковый материал на основе железа привело к повышению прочности, твердости, плотности и к снижению температуры спекания [12].

Применяются также для повышения свойств материалов на железной основе добавки порошков керамики, в частности, оксидов, боридов, карбидов [13–16].

Особенно эффективно микролегирование для активации спекания материалов на основе железа. В качестве добавок для такой активации используются соединения, вызывающие при спекании реакции окисления – восстановления, например, бикарбоната натрия [13–16] или механоактивированных порошков оксидов [16].

Однако при микролегировании получить однородную структуру крайне затруднительно, поэтому обычно применяют введение добавок в виде лигатур. В классической металлургии лигатуру получают сплавлением входящих в ее состав компонентов либо восстановлением их из руд, концентратов или окислов. В порошковой металлургии лигатура, как правило, представляет собой смесь с большей, чем в готовом материале, концентрацией добавки.

В работах [14, 15] в качестве добавок для активации спекания порошковых материалов на основе железа использовали молибденат кальция (CaMoO_4), нитрид бора (NB) и бикарбонат натрия (NaHCO_3). Введение добавок бикарбоната натрия и молибдената кальция обусловлено предположением, что активация спекания порошковой стали идет за счет реакций окисления – восстановления при разложении соединений, нитрида бора – за счет модификации структуры. Добавки вводились в смесь железа с 1 % графита в количестве 0,5 и 1 % в исходном состоянии и в виде лигатуры, состоящей из 50 % железа и 50 % добавки.

Введение добавок в виде лигатуры, благодаря более равномерному распределению добавки в материале, стабилизирует объемные изменения, и при спекании при температуре 1000–1100 °С они практически одинаковые.

Повышение содержания добавки до 1 %, независимо от ее состава, приводит к росту размеров образцов при всех температурах спекания. Наиболее существенные объемные изменения наблюдаются при введении бикарбоната натрия, усадка образцов с добавкой 0,5 % NaHCO_3 , спеченных при температуре 1000 °С, составляет 2,6 %, при температуре 1100 °С – 3,1 %. Увеличение количества добавки до 1 %, независимо от ее состава, приводит к росту образцов. Минимальный рост (0,1–0,4 %) наблюдается при введении молибдената кальция.

Влияние состава добавки на прочность порошковой стали при различных температурах спекания неоднозначно (рис. 2).

Так, введение бикарбоната натрия существенно повышает прочность стали после спекания при 900 и 1000 °С и незначительно – при 1100 °С, а его введение в виде лигатуры практически не оказывает влияния на изменение прочности стали. Это говорит о том, что процессы воздействия бикарбоната натрия на

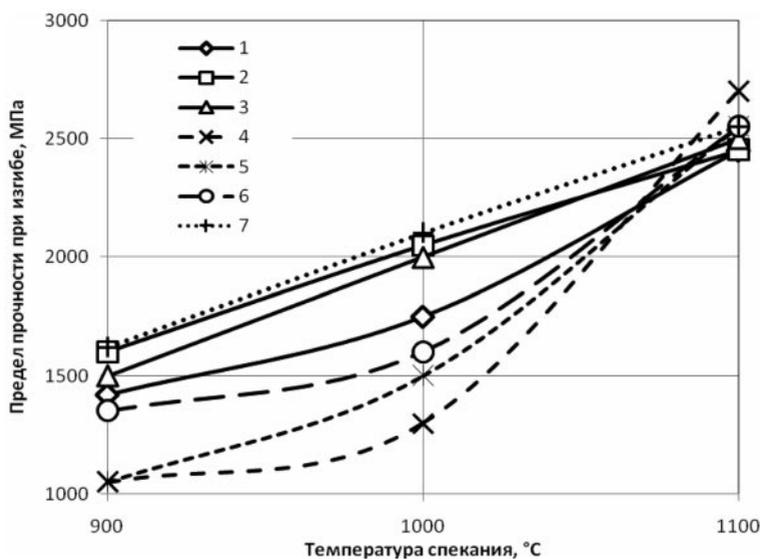


Рис. 2. Влияние введения добавки соли на прочность порошковой стали ПК80: 1 – без добавки; 2 – 0,5 % NaHCO_3 ; 3 – 0,5 % NaHCO_3 в виде лигатуры; 4 – 0,5 % CaMoO_4 ; 5 – 0,5 % CaMoO_4 в виде лигатуры; 6 – 0,5 % BN; 7 – 0,5 % BN в виде лигатуры

диффузионные процессы в порошковой стали при спекании столь активны, что его распределение в объеме не имеет существенного значения.

Введение молибдата кальция привело к снижению прочности порошковой стали, спеченной при температуре 900 и 1000 °С (рис. 2, кривые 4 и 5), и к незначительному повышению – спеченной при 1100 °С. Это объясняется тем, что при низких температурах спекания восстановление и разложение соединения не происходит, частицы соединения, располагаясь, как правило, по границам зерен, ослабляют их, соответственно снижается прочность (рис. 3, *а*). При температуре спекания 1100 °С начинаются процессы восстановления молибдата кальция и происходит легирование тела зерна молибденом (рис. 3, *б*).

Кальций, имеющий большое сродство к кислороду и различным примесям, образует соединения ферритного типа, очищая тем самым границы зерен. Такое влияние щелочных и щелочно-земельных металлов в порошковых сталях было показано в работе [17].

Введение добавки в виде лигатуры оказалось значимым лишь для нитрида бора. Так, предел прочности при изгибе порошковой стали ПК80 с нитридом бора в количестве 0,5 % в исходном состоянии повысился на 15–20 МПа только после спекания при 1100 °С, в виде лигатуры – на 25–35 МПа и после спекания при 900–1100 °С. Структура порошковой стали при этом

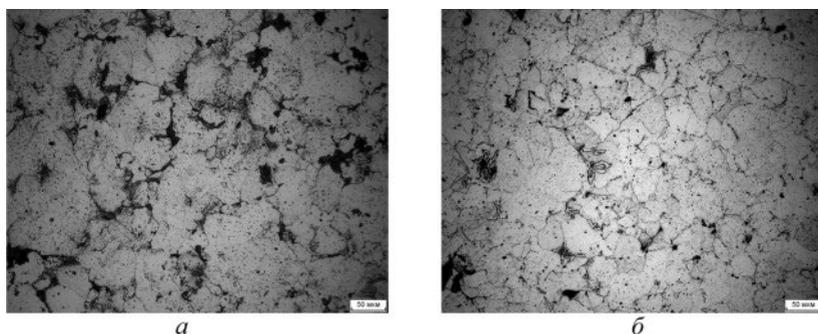


Рис. 3. Структура спеченной порошковой стали ПК80 с добавкой 0,5% CaMoO_4 при температуре спекания 900 °С (*а*); 1100 °С (*б*)

имеет более чистые границы, равномерный размер зерна уже после спекания при 900 °С (рис. 4).

Поскольку нитрид бора, взаимодействуя с углеродом в железной основе при спекании, образует твердые дисперсные выделения карбоборидов, препятствующие перемещению дислокаций и тормозящие тем самым рост зерна, равномерность их распределения оказывает влияние на уровень однородности зернистости структуры и, соответственно, на прочность стали.

При повышении содержания добавки бикарбоната натрия и нитрида бора до 1 % неоднородность их распределения в структуре порошковой стали увеличивается. Введение их в исходном состоянии снижает прочность стали на 30–40 МПа, а в виде лигатуры – повышает. Так, предел прочности стали ПК80, спеченной при 900 °С, составляет 1380 МПа, стали с добавкой лигатуры с бикарбонатом натрия – 1700 МПа, лигатуры с нитридом бора – 1540 МПа.

Из рис. 2 и 3 видно, что введение добавок бикарбоната натрия и нитрида бора в количестве 0,5 % оказывает активирующее влияние на формирование структуры порошковой стали при спекании, способствуя повышению ее прочности. Введение добавок соединений, имеющих существенно меньшую плотность, чем основа материала, в виде лигатуры оправдано, только когда количество добавки более 1 %.

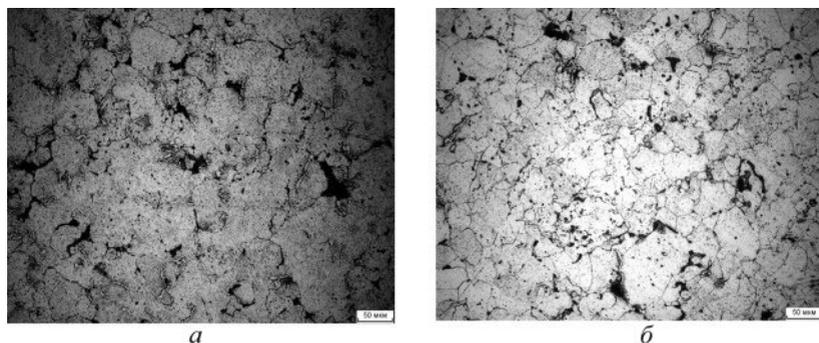


Рис. 4. Структура спеченной порошковой стали ПК80 с добавкой 0,5% BN при температуре спекания 900 °С (а); 1100 °С (б)

Исследовано влияние методов введения микролегирующих добавок различной природы в порошковую углеродистую сталь на ее пористость, формирование структуры и прочность. Установлено, что при введении молибдата кальция прочность порошковой стали, спеченной при температуре 900 и 1000 °С, вследствие ослабления границ зерен снижается. При температуре спекания 1100 °С благодаря разложению молибдата кальция происходит легирование тела зерна молибденом и прочность стали повышается на 200–500 МПа.

При проведении исследований закономерностей термической обработки порошковых легированных сталей выбранных составов, включая спекание и газовую закалку (sinter-hardening) [18], были использованы стандартные методики изучения структуры и свойств материалов.

Образцы цилиндрической (диаметром 11 мм и высотой 11 мм) и призматической формы (высотой 11 мм, шириной 11 мм и длиной 60 мм) были изготовлены с применением технологии sinter-hardening: по варианту прессования и последующего спекания, совмещенного с газовой закалкой. Технология прессования – спекания включала приготовление шихты в конусном смесителе с добавлением 0,8 % стеарата цинка (либо использование готовой смеси производства фирмы «Хеганес»), прессование при давлении 650 МПа с достижением сырой плотности 7,0–7,1 г/см³.

Спекание в атмосфере эндогаза проводили при следующих температурах: 1120, 1170, 1220 °С. Время спекания образцов в высокотемпературной зоне – 48 мин. Восстановление потерянного при спекании углерода в специальной зоне с углеродным потенциалом 0,8 % при температуре 900 °С в течение 1 ч. Охлаждение в потоке холодного эндогаза варьировали в диапазоне от естественного конвективного охлаждения в холодильнике печи до вынужденного конвективного охлаждения в диапазоне скоростей от 1,0; 2,5 и 5,0 °С/с. Вынужденное конвективное охлаждение порошковых образцов проводили в специальном закалочном блоке, встроенном в конструкцию печи. После проведения спекания все образцы подвергали отпуску при температуре 180 °С в течение 1 ч.

Анализ экспериментальных результатов позволяет сделать следующие основные выводы. Для всех изученных материалов рост скорости закалки приводит к увеличению твердости полученных закаленных в потоке холодного эндогаза образцов порошковых деталей. Так, при изменении скорости закалки в интервале от 1 до 5 °С/с твердость цилиндрических образцов порошковой стали ПК70Н4Д1,5М0,5, спеченных при температуре 1120 °С, повышается с 38 до 43 HRC (рис. 5).

При повышении температуры спекания до 1220 °С за счет более полного протекания диффузии никеля, меди и молибдена в железо твердость порошковой стали в закаленном состоянии увеличивается до 50–53 HRC.

Анализируя изменения размеров образцов исследуемых сталей после спекания и последующей закалки в потоке холодного эндогаза, можно отметить, что изменение скорости закалки в интервале от 1 до 5 °С/с практически не влияет на размеры закаленных образцов как цилиндрической, так и призматической формы. Более существенное влияние на изменение размеров оказывает температура спекания.

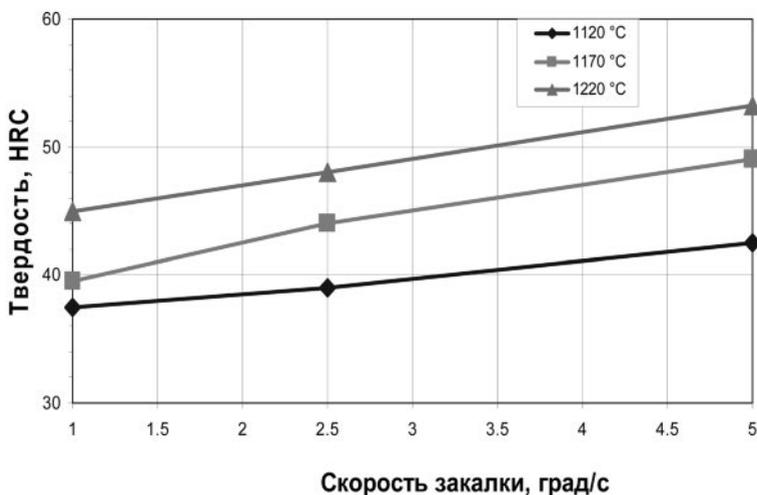


Рис. 5. Зависимость твердости цилиндрических образцов порошковой стали ПК70Н4Д1,5М0,5 от скорости закалки

Существенное увеличение усадки с ростом температуры наблюдается у порошковой стали ПК70Н4Д1,5М0,5: с 0,10–0,15 % при температуре 1120 °С до 0,35–4 % при температуре 1220 °С. Уменьшение содержания никеля до 1,75 % в порошковой стали ПК70Н1,75Д1,5М0,5 стабилизирует изменение размеров: при температуре 1220 °С усадка практически отсутствует, а при температурах в диапазоне 1120–1170 °С наблюдается даже незначительный (0,1 %) рост. Изменение температуры в исследованном диапазоне практически не влияет на изменение размеров после закалки образцов стали ПК70Д2М1,5 (наблюдается незначительное увеличение до 0,1 %). Аналогичное поведение после закалки наблюдается у образцов стали ПК70Н2М1,5: температура также практически не влияет на изменение размеров, однако после закалки наблюдается небольшая усадка до 0,1 %.

Таким образом, изменяя температуру спекания и скорость закалки, можно регулировать твердость и прочность исследуемых материалов, обеспечивая необходимые функциональные свойства готовых изделий.

Проведенные исследования позволили разработать технологию получения заготовки детали «Кольцо блокировочное» синхронизатора коробки передач из порошковой смеси Densmix на базе диффузионно легированного порошка Distaloy AE с применением теплого прессования, спекания, закалки в потоке холодного эндогаза и нанесения газопламенного молибденового покрытия. Разработана также технология получения заготовки детали «Кольцо коническое» синхронизатора коробки передач из порошковой смеси на базе диффузионно легированного порошка Distaloy DC с применением прессования, предварительного низкотемпературного спекания, калибровки, высокотемпературного спекания, механической и химико-термической обработки.

Изготовлены партии порошковых заготовок деталей «Кольцо блокировочное» и «Кольцо коническое» синхронизатора в количестве 200 штук каждого наименования (рис. 6).

На РУП «МТЗ» проведена разработка технологических процессов механической обработки деталей синхронизаторов и их



Рис. 6. Порошковые заготовки деталей «Кольцо блокировочное» и «Кольцо коническое» синхронизатора коробки передач трактора «Беларусь»



Рис. 7. Комплект деталей синхронизатора коробки передач трактора «Беларусь»

сборки в комплектный узел (рис. 7). Изготовлена установочная серия синхронизаторов в количестве 100 штук, проведены их стендовые и полевые испытания.